

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE EN LA
EMPRESA MAGNETRON S.A.S

KELLY YOJANA AGUDELO MARÍN

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
PEREIRA
2019

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE EN LA
EMPRESA MAGNETRON S.A.S

KELLY YOJANA AGUDELO MARÍN

Proyecto de grado en modalidad de práctica de extensión, presentado como
requisito parcial para aspirar al título de Ingeniero Electricista

Director

MSc. Duberney Murillo Yarce

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PEREIRA

2019

A mi padre Guillermo Agudelo y a mi madre Luz Marina Marín

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
NOMENCLATURA	6
LISTA DE ECUACIONES	8
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABLAS	11
1 PRELIMINARES.....	12
1.1 Planteamiento del problema	12
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo general.....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
2 MARCO TEÓRICO	14
2.1 Transformadores de corriente	14
2.2 Principio de funcionamiento.....	14
2.3 Ley de Ampere.....	14
2.4 Curva de Magnetización.....	16
2.5 Curva de excitación y curva de pérdidas.....	17
2.6 Ley de inducción de Faraday.....	17
2.7 Tipos de construcción	18
2.8 Componentes del transformador de corriente	19
2.8.1 Núcleo	19
2.8.2 Devanado primario y secundario	19
2.8.3 Aislamiento.....	20
2.9 Circuito equivalente	20
2.10 Normatividad.....	20
2.11 Clases de precisión	21
2.12 Medición de errores	22
2.13 Variación del Burden	22

2.14	Variación del factor de potencia	23
2.15	Operación	23
3	METODOLOGÍA	24
3.1	Cálculo de las dimensiones del núcleo	24
3.2	Cálculo del devanado secundario	26
3.3	Cálculo del error de relación y error de fase	26
4	EXPERIMENTOS Y RESULTADOS	30
4.1	Transformador de corriente de 100/5 A	30
4.2	Cálculos	30
4.3	Construcción del prototipo	31
4.4	Resultados	33
4.5	Análisis de resultados	36
4.6	Dificultades	37
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	38
5.1	Conclusiones	38
5.2	Trabajos futuros	39
	REFERENCIAS	40
	ANEXOS	41

NOMENCLATURA

TC	Transformador de Corriente
H	Intensidad de campo magnético
I_{neta}	Corriente del campo magnético de integración (Amperios)
dl	diferencial de línea del campo magnético de integración
l_m	Longitud media (metros)
Ni	Fuerza magnetomotriz (Amperios-vuelta)
B	Densidad de campo magnético (Tesla o Gauss)
μ	Permeabilidad magnética del material (Newton/ ampere ²)
φ	Flujo magnético (Weber)
V_{ind}	Voltaje inducido en el secundario (Voltios)
$d\varphi$	Diferencial de flujo magnético
dt	Diferencial de tiempo
I_p	Corriente del devanado primario (Amperios)
I_s	Corriente del devanado secundario (Amperios)
R_m	Resistencia de la rama de magnetización (Ohmios)
L_m	Inductancia de la rama de magnetización (Henrios)
R_s	Resistencia del secundario (Ohmios)
L_s	Inductancia del secundario (Henrios)
Z_c	Impedancia de carga (Ohmios)
R_c	Resistencia de carga (Ohmios)
X_c	Reactancia de carga (Ohmios)
I_m	Corriente de magnetización (Amperios)
I_w	Corriente de la resistencia de magnetización (Amperios)

I_o	Corriente de la inductancia de magnetización (Amperios)
I_{sm}	Corriente medida en el secundario (Amperios)
$burden$	Carga del transformador de corriente (Voltamperios)
e	Error de corriente (%)
Área_T	Área transversal del núcleo (centímetros ²)
f	Frecuencia (Hertz)
N_p	Número de espiras en el primario
N_s	Número de espiras en el secundario
S_i	Factor de apilamiento
bi	Ancho de la lámina de silicio (centímetros)
ai	Apilamiento del núcleo (centímetros)
D_{int}	Diámetro interno del TC (centímetros)
D_{medio}	Diámetro medio del TC (centímetros)
D_{ext}	Diámetro externo del TC (centímetros)
L_{cond}	Longitud del conductor del TC (metros)
Sección_{cond}	Sección del conductor del TC (milímetros ²)
J	Densidad de corriente (amperios/milímetros ²)
R_{cond}	Resistencia del conductor del TC (Ohmios)
Peso_{cond}	Peso del conductor del TC (Ohmios)
θ_{zc}	Ángulo de la carga (grados)
fp	Factor de potencia
R_T	Resistencia total del TC (Ohmios)
Z_T	Impedancia total del TC (Ohmios)
β	Ángulo entre I_m e I_w (grados)
e_{ang}	Error angular de corriente (%)
V_s	Voltaje secundario (Voltios)

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 2.1 Ley de Ampere	15
Ecuación 2.2 Ecuación que relaciona intensidad de campo con fuerza magnetomotriz	15
Ecuación 2.3 Densidad de campo magnético en términos de la intensidad de campo	15
Ecuación 2.4 Densidad de campo en términos de la fuerza magnetomotriz	15
Ecuación 2.5 Ley de Gauss para el magnetismo	15
Ecuación 2.6 Flujo magnético en términos de la permeabilidad, fuerza magnetomotriz y longitud media	15
Ecuación 2.7 Ley de inducción de Faraday-Lenz	17
Ecuación 2.8 Error de relación del transformador de corriente	22
Ecuación 3.1 Ecuación fundamental de la máquina	24
Ecuación 3.2 Relación de transformación de corriente	25
Ecuación 3.3 Área total del núcleo	25
Ecuación 3.4 Diámetro externo del núcleo	25
Ecuación 3.5 Diámetro medio del núcleo	25
Ecuación 3.6 Longitud media del núcleo	25
Ecuación 3.7 Peso del núcleo	26
Ecuación 3.8 Longitud del conductor secundario	26
Ecuación 3.9 Sección del conductor secundario	26
Ecuación 3.10 Resistencia del conductor secundario	26
Ecuación 3.11 Peso del conductor secundario	26
Ecuación 3.12 Determinación de la impedancia de carga	27
Ecuación 3.13 Ángulo de la impedancia de carga	27
Ecuación 3.14 Impedancia de carga en términos de resistencia y reactancia	27
Ecuación 3.15 Resistencia de carga en términos del ángulo y la impedancia	27
Ecuación 3.16 Reactancia de carga en términos del ángulo y la impedancia	27
Ecuación 3.17 Relación del factor de potencia con el ángulo de carga	27
Ecuación 3.18 Resistencia de carga en términos del fp	27
Ecuación 3.19 Resistencia total del TC	28
Ecuación 3.20 Impedancia total del TC	28
Ecuación 3.21 Cálculo del voltaje inducido	28
Ecuación 3.22 Campo magnético de prueba	28
Ecuación 3.23 Corriente de magnetización	28
Ecuación 3.24 Corriente por la resistencia de magnetización	28

Ecuación 3.25 Ángulo entre la corriente total de magnetización y la corriente en la resistencia de magnetización.....	28
Ecuación 3.26 Corriente secundaria I_s	29
Ecuación 3.27 Porcentaje de error de relación	29
Ecuación 3.28 Error de fase	29

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 2.1. Curva de Magnetización de lámina tipo M3 del fabricante AK Steel....	16
Figura 2.2. Transformadores de corriente de uso interior. De izquierda a derecha, TC tipo devanado, TC tipo ventana y TC tipo barra.....	18
Figura 2.3. Transformadores de corriente de uso exterior. De izquierda a derecha, TC tipo horquilla y TC tipo núcleo.....	19
Figura 2.4. Circuito equivalente del transformador de corriente.	20
Figura 3.1 Diagrama de flujo sobre la metodología planteada.....	24
Figura 4.1 Núcleo de silicio para el TC con relación 100 a 5 A.....	32
Figura 4.2 Vista frontal del transformador de corriente con relación 100/5 A, 5VA de Burden.	32
Figura 4.3. Vista lateral del transformador de corriente con relación 100/5 A, 5VA de Burden.	33
Figura 4.4 Equipo de prueba CPC 100	34
Figura 4.5 Esquema de la prueba.....	34
Figura 4.6 Conexión del transformador de corriente.....	34
Anexo. 1 Valores de excitación (VA_{kg}).....	41
Anexo.2 Curva de excitación (VA_{kg})	41
Anexo.3 Valores de pérdidas por efecto Joule (W_{kg})	42
Anexo.4 Curva de pérdidas por efecto Joule (W_{kg})	42

LISTA DE TABLAS

pág.

Tabla 2.1 Errores de relación y fase para clases de precisión 0,1 - 0,2 - 0,5 y 1 ..	21
Tabla 2.2 Errores de relación y de fase para clases de precisión 0,2S y 0,5S	21
Tabla 2.3 Errores de relación para las clases de precisión 3 y 5	22
Tabla 4.1 Parámetros para un transformador de corriente con relación 100/5 A...	30
Tabla 4.2 Parámetros medidos en el TC sin carga.	35
Tabla 4.3 Parámetros medidos en el TC con carga.....	35

1 PRELIMINARES

1.1 Planteamiento del problema

En el sistema eléctrico de potencia intervienen gran cantidad de elementos que permiten el funcionamiento idóneo de la red, generando, transmitiendo y distribuyendo energía eléctrica para llegar a cada uno de los hogares que se encuentran interconectados. No obstante, esta cadena productiva no podría lograrse sin la acción de un elemento fundamental como el transformador de energía [1]. Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas que gracias al principio de inducción de Faraday permiten elevar o reducir los niveles de tensión según la necesidad de la red, conservando la potencia eléctrica entre el devanado primario y el devanado secundario. En el mundo se pueden encontrar diferentes tipos de transformadores, su estructura y capacidad dependen netamente de la función que vayan a desempeñar dentro del sistema de potencia. Existen transformadores usados en distribución de energía para redes secundarias de las ciudades, transformadores de potencia para uso en subestaciones y transformadores de instrumentación, tales como los de corriente y potencial, empleados para diversas aplicaciones de protección de equipos.

Los Transformadores de Corriente (TCs) son usados en instrumentación como elemento de medición y protección de elementos del sistema eléctrico de potencia, están ubicados en líneas de transmisión y distribución, generadores, subestaciones y transformadores de distribución y potencia [2]. Los TCs se encargan de sensor corrientes altas y convertirlas a pequeñas señales cuyas medidas nominales se reproducen en valores de 1 y 5 A, magnitudes que son perfectamente legibles por los relés análogos o digitales para generar alguna decisión de maniobra que garantice la estabilidad de los equipos [3].

Industrias Magnetrón SAS es una compañía con 47 años de experiencia en el mercado de transformadores y dada la pujanza de sus directivos ha avanzado en el desarrollo de nuevos productos y en el posicionamiento de la compañía a nivel nacional e internacional, por lo que hoy ve la necesidad de crear una nueva línea de manufactura de transformadores de corriente para medición como primera medida para auto-abastecerse cuando sean requeridos como insumo para la fabricación de transformadores de distribución y potencia, además de incursionar en nuevos mercados con la ampliación de su portafolio de ofertas. En ese orden de ideas, el problema de investigación de la práctica conducente a trabajo de grado está orientado a encontrar una metodología de cálculo del transformador de corriente de medida, de tal manera que pueda ser aplicada para construir transformadores de corriente en la empresa Magnetrón SAS.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar un conjunto de ecuaciones que permita determinar los parámetros eléctricos y constructivos de transformadores de corriente de medición para una futura fabricación en la empresa Magnetron SAS.

1.2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un conjunto de ecuaciones que permitan representar adecuadamente el transformador de corriente de medición.
- Diseñar un transformador de corriente prototipo con todos sus parámetros, de tal manera que pueda ser implementado en la realidad.
- Elaborar ensayos que permitan validar la idoneidad de los cálculos realizados.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Transformadores de corriente

Los valores de corriente y voltaje no pueden ser medidos directamente del sistema de potencia debido a sus grandes magnitudes, éstas afectarían los dispositivos de control que suelen ser de pequeña potencia, razón por la cual se crearon los transformadores de corriente. Su función es la de reducir los niveles de corriente tomados en una medida y convertirlos a valores típicos de 1 y 5 A, con el fin de que los dispositivos de protección y medición puedan leer la información que arroja el elemento de la red que se esté midiendo de una manera segura, confiable y con el menor error de medición posible [4].

Los transformadores de corriente (TCs) se construyen generalmente con una sola espira en el primario quien atraviesa un núcleo magnético, donde se encuentran enrolladas las espiras del secundario con la mayor uniformidad posible, de tal manera que los flujos magnéticos se enlacen adecuadamente y evitar pérdidas por dispersión [3]. También pueden disponer de varios devanados secundarios con características iguales o diferentes, por medio de núcleos separados magnéticamente [5].

Existen TCs para diferentes aplicaciones en medición y protección. Los TCs de protección se usan para llevar mediciones a relés de distancia, direccionales y de protección. Los TCs de medida se usan para alimentar elementos de esta misma índole como son los amperímetros, reguladores, vatímetro, fasímetros y equipos de medición en laboratorios. Los transformadores de corriente de medición serán el objeto de investigación del presente trabajo.

2.2 Principio de funcionamiento

Un transformador de corriente funciona mediante la acción de principios electromagnéticos que aplican al transformador convencional. Una señal de tensión alterna se aplica al devanado de alta tensión quien magnetiza el núcleo, al mismo tiempo se induce una fuerza electromotriz que induce una corriente en el devanado secundario, esta corriente se opone a la magnetización del núcleo. Lo anterior se produce gracias a la Ley de Ampere y la ley de inducción de Faraday-Lenz.

2.3 Ley de Ampere

La ley de Ampere introduce los conceptos sobre la producción de campo magnético por medio de una corriente y se expresa mediante (2.1).

$$\oint H \cdot dl = I_{neta} \quad (2.1)$$

Siendo H la intensidad de campo magnético producido por I_{neta} en una trayectoria dl . Se considera la distancia que recorre el flujo magnético por el núcleo como la longitud media lm del mismo, y Ni la fuerza magnetomotriz producida por la corriente total que pasa por el campo de integración I_{neta} , realizando este reemplazo se obtiene la ecuación (2.2) [6].

$$H \cdot lm = Ni \quad (2.2)$$

Despejando H , se obtiene:

$$H = \frac{Ni}{lm} \left[\frac{A \cdot vuelta}{m} \right]$$

La intensidad de campo magnético H es la medida de esfuerzo de una corriente por establecer un campo magnético B , la relación entre la intensidad de campo magnético y la densidad de flujo producido en el material está dada por:

$$B = \mu H \text{ [T o Gauss]} \quad (2.3)$$

μ es la permeabilidad del material y simboliza la facilidad relativa para establecer un campo magnético en el mismo. Los transformadores se construyen con materiales ferromagnéticos cuya permeabilidad es variable y suele tener valores altos.

De (2.2) se despeja H y se reemplaza en (2.3), dando como resultado la densidad de flujo magnético B expresada en términos de la permeabilidad μ , la fuerza magnetomotriz Ni y la longitud media del núcleo lm .

$$B = \mu H = \frac{\mu \cdot Ni}{lm} \quad (2.4)$$

El flujo magnético está dado por la ecuación (2.5).

$$\varphi = \int B \cdot dA \quad (2.5)$$

Si el flujo magnético es constante y a su vez es perpendicular al vector de área, la ecuación se puede reducir a:

$$\varphi = B \cdot A$$

Reemplazando la densidad de flujo magnético B según la ecuación (2.4), se obtiene:

$$\varphi = \frac{\mu \cdot Ni \cdot A}{lm} \text{ [Wb]} \quad (2.6)$$

Donde A es el área de la sección transversal del núcleo.

2.4 Curva de Magnetización

Como se enunció en el numeral anterior la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos es muy alta. Sin embargo, no es un valor constante y para mostrar su comportamiento se aplica una corriente directa al núcleo desde cero y se incrementa paulatinamente hasta la máxima corriente posible. Cuando se grafica el valor de la fuerza magnetomotriz Ni con respecto a la densidad de flujo magnético B producido, se obtiene la *Curva de Magnetización*. Analizando la ecuación (2.2) se observa que la intensidad de campo magnético H es directamente proporcional a la fuerza magnetomotriz Ni y en la ecuación (2.5) que la densidad de campo magnético B es directamente proporcional al flujo magnético ϕ , por lo anterior, la gráfica de densidad de flujo magnético B contra intensidad de campo magnético H , es homóloga a la curva de flujo magnético ϕ contra fuerza magnetomotriz Ni [6].

Como se puede observar en la Figura 2.1, en el inicio de la curva al incrementar el valor de la intensidad del campo magnético, la densidad de campo se incrementa rápidamente, sin embargo, en un punto de la curva el crecimiento se hace más lento hasta el punto de que un crecimiento en la intensidad no significa un incremento en la densidad de campo, este punto de la curva se denomina *región de saturación*.

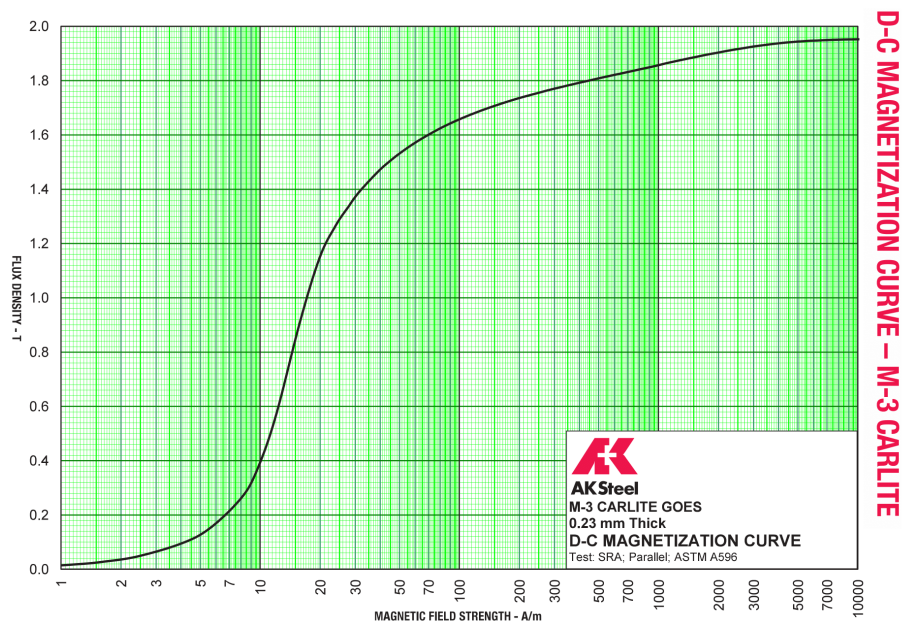


Figura 2.1. Curva de Magnetización de lámina tipo M3 del fabricante AK Steel [7].

Lo anterior permite concluir que la permeabilidad de los materiales ferromagnéticos es la pendiente de la curva B vs H , que suele ser constante y relativamente grande en la región no saturada de la curva y decrece cuando el núcleo

La Figura 2.1 muestra la curva de magnetización para una lámina tipo M3 usada en la construcción de transformadores. Esta lámina está construida con aleaciones de

hierro y silicio, materiales ferromagnéticos que permiten obtener inducciones altas y bajas pérdidas en el núcleo, características que son primordiales para aumentar la eficiencia de los transformadores. Las láminas construidas en este material presentan una alta resistencia al daño producido en el núcleo por el proceso de fabricación, además de producir un menor ruido por magnetostricción y presentar un bajo coeficiente de fricción, que facilita el ensamble del núcleo [7].

2.5 Curva de excitación y curva de pérdidas

El núcleo de los transformadores está conformado por láminas de material ferromagnético. Al someter un material ferromagnético a un ciclo B vs H se generan pérdidas por corrientes parásitas y por la histéresis. Las corrientes parásitas generan calentamiento debido al efecto $I^2 \cdot R$, por lo que esa energía se convierte en pérdidas de tipo W/kg . La histéresis es la energía consumida al tratar de orientar las partículas del material ferromagnético en dirección al campo magnético, este comportamiento se muestra en la curva de excitación VA/kg y equivale a las pérdidas de energía totales. Ambas pérdidas dependen de la calidad y porcentaje de silicio presente en las láminas del núcleo, el grado de orientación del grano, del espesor del material y la densidad de flujo [8].

Las curvas de excitación VA/kg y de pérdidas W/kg que serán usadas en el presente trabajo se encuentran en la sección de anexos con sus respectivas tablas de datos. La información fue suministrada por el proveedor de la lámina de silicio [7].

2.6 Ley de inducción de Faraday

La ley de inducción de Faraday es la propiedad fundamental de los campos magnéticos que permiten la funcionalidad de los transformadores y establece que si un flujo magnético atraviesa una espira de alambre conductor se inducirá un voltaje proporcional a la tasa de cambio del flujo con respecto al tiempo. Si se trata de un devanado de varias espiras se adiciona el número de las mismas en la ecuación, así:

$$V_{ind} = \frac{-N d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

El signo menos se debe a la ley de Lenz y establece que la dirección del voltaje inducido en la bobina produce una corriente que genera un flujo magnético opuesto al flujo inicial, es decir, permite predecir la polaridad de los voltajes inducidos en las bobinas de transformador [6].

2.7 Tipos de construcción

La construcción de los transformadores de corriente depende del uso, aplicación y ambiente de operación, por lo cual esta clasificación se divide en dos grupos muy importantes: TCs de uso interior y TCs de uso exterior.

Existen tres tipos de TCs de uso interior. El primero de ellos es el tipo devanado, su construcción es similar a la de un transformador de tensión monofásico, tiene dos terminales externos a los cuales se conecta el conductor primario, este puede estar devanado en el núcleo con una o varias vueltas aislado del conductor secundario también enrollado en el núcleo. El TC tipo ventana es aquel que el primario es el conductor de potencia que transporta la corriente y pasa por una abertura circular a través del núcleo toroidal con el secundario enrollado en este. El TC tipo barra similar al tipo ventana, con la diferencia que tiene una barra que atraviesa el núcleo, con dos terminales a cada lado que se conectan al conductor primario [4].

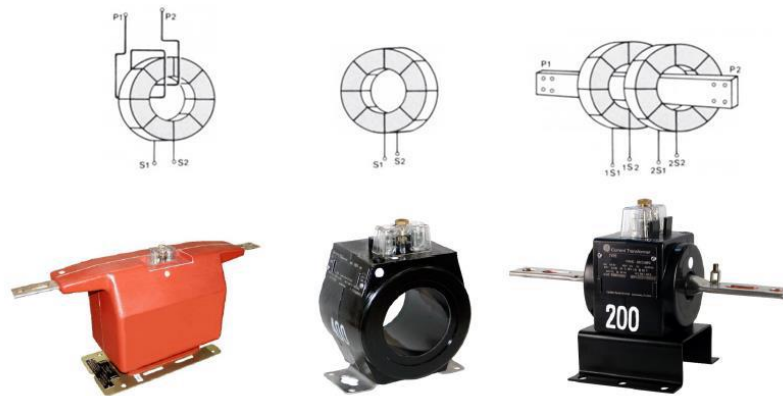


Figura 2.2. Transformadores de corriente de uso interior. De izquierda a derecha, TC tipo devanado, TC tipo ventana y TC tipo barra [3].

Los transformadores de corriente de uso exterior se fabrican principalmente de dos tipos, tipo horquilla y tipo núcleo superior. El primero se denomina horquilla por la disposición en “u” de su devanado primario, tiene un bajo centro de gravedad por lo que le permite ser más robusto y se suele ubicar en las partes bajas de los transformadores (cuando se usa para esta aplicación). El segundo se denomina tipo núcleo superior, y se ubica en las partes superior de los transformadores, tiene la característica de ofrecer pérdidas térmicas bajas dada la corta longitud del conductor primario [3].

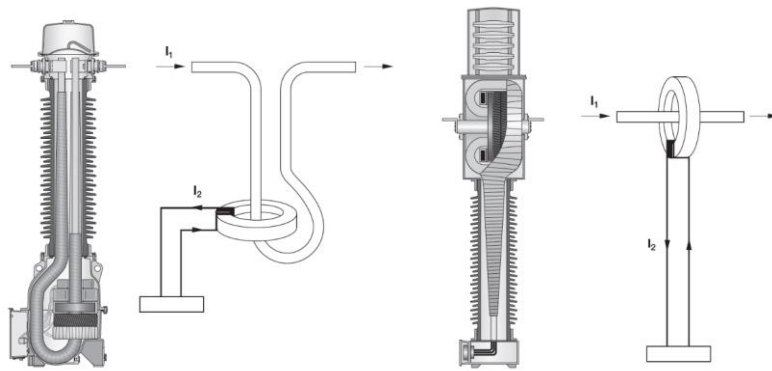


Figura 2.3. Transformadores de corriente de uso exterior. De izquierda a derecha, TC tipo horquilla y TC tipo núcleo [3].

Para este trabajo se determina la construcción de un TC tipo ventana de uso interior, debido a que cumple con las características de los TCs que se usan normalmente en la línea de producción de Magnetron SAS.

2.8 Componentes del transformador de corriente

2.8.1 Núcleo

El núcleo de un TC cumple con la función de acoplar magnéticamente los devanados primario y secundario. Se compone de láminas de material ferromagnético de rápida saturación y de alta permeabilidad magnética, la primera característica garantiza la protección del devanado secundario ante un aumento súbito en la corriente primaria por motivo de una falla, debido a que al saturarse el núcleo impide el aumento infinito de la corriente secundaria. El segundo aspecto permite obtener grandes precisiones ante corrientes de entrada muy baja [3]. Una de las características más importantes al momento de diseñar un núcleo es la frecuencia de excitación, quien afecta el tiempo que tarda el núcleo en saturarse [2].

2.8.2 Devanado primario y secundario

El devanado primario del TC se conecta en serie con el elemento que se desea medir, la conexión depende del tipo de equipo, para TCs con devanado en el primario el elemento a medir se conecta directamente a las espiras que se encuentran en el lado exterior. En el caso de los transformadores tipo ventana, el elemento a medir pasa por el centro del TC, haciendo las veces de circuito primario.

El devanado secundario consiste en arrollamientos de alambre generalmente de cobre alrededor de toda la sección del núcleo, a este circuito se conectan los instrumentos de medida tales como amperímetros, vatímetros o relés.

2.8.3 Aislamiento

El aislamiento interno de los transformadores de corriente consiste en proteger el devanado secundario del núcleo, por medio de un material dieléctrico como el papel, con el fin de evitar cortos entre espiras por debilitamiento del esmalte en contacto con el núcleo. En el caso de transformadores con dos devanados se debe aislar uno de ellos o ambos.

El aislamiento externo depende de la aplicación para la cual sean diseñados, si los TCs se van a usar en el interior de transformadores de potencia o de lugares donde se encuentran protegidos, basta con recubrir de una hiladilla de alta calidad el devanado secundario del transformador. Si por el contrario el TC estará expuesto a la interperie se debe cubrir con resinas y materiales especiales que brinden protección y seguridad al equipo.

2.9 Circuito equivalente

El circuito equivalente del transformador de corriente es idéntico al de un transformador convencional, por lo que se consideran los mismos elementos resistivos e inductivos que representan las pérdidas de la rama de dispersión y magnetización. En la Figura 2.4 se observa el circuito equivalente, con la impedancia de dispersión representando el efecto inductivo y resistivo de los conductores y la rama de magnetización representando las pérdidas por calentamiento e histéresis, por esta rama pasa la corriente de magnetización, quien será determinante para encontrar el error de medición del transformador.

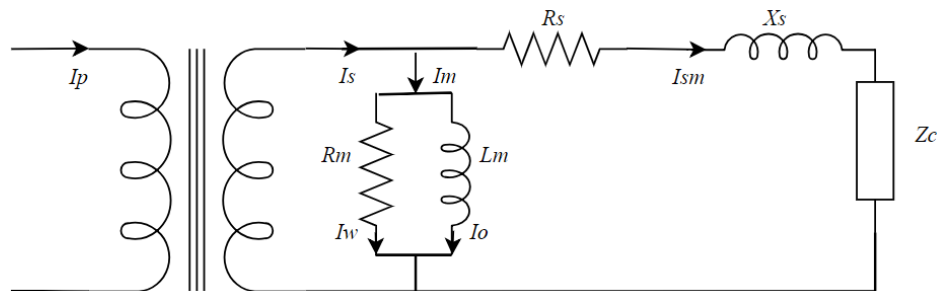


Figura 2.4. Circuito equivalente del transformador de corriente [4].

2.10 Normatividad

La Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) en su resolución 038 de 2014 establece el nuevo código de medida, que contiene importantes parámetros que se deben cumplir en Colombia para procesos de medición inteligente, las características técnicas que deben cumplir los equipos de medición, telecomunicaciones y de respaldo, y los requisitos de instalación, pruebas,

calibración, certificación, operación y mantenimiento de los mismos. Este documento estipula que los transformadores de corriente deben usarse en instalaciones eléctricas siempre y cuando se encuentren certificados bajo la norma IEC 61869 o la norma NTC 2205 [9].

La NTC 2205 es la norma bajo la cual se certifican la mayor parte de los TCs en el país y contiene importantes definiciones sobre transformadores de corriente, instituye las condiciones normales de servicio, valores normalizados de corriente primaria, secundaria y de potencia nominal y consolida los requisitos de diseño de aislamiento, requisitos mecánicos y límites de errores en la medición [10].

2.11 Clases de precisión

La clase de precisión o clase de exactitud se define como un valor que traduce el máximo error de corriente permisible en el secundario del TC para un Burden igual o menor al nominal y diferentes valores de corriente. Según la NTC 2205 están normalizados seis clases de precisión: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – 5.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se muestra el error máximo de relación y de fase para las clases de precisión 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 0,2S y 0,5S. Las clases de precisión 0,2S y 0,5S poseen errores iguales a los de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** pero consideran un rango de carga más extendido (desde 1 VA hasta el 100% del Burden). Para los errores de las Tablas I y II estos son los máximos permisibles para cualquiera valor de Burden entre el 25% y 100% del nominal, mientras que la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la información para un Burden entre 50% y 100% del nominal. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** no se consideran los errores de desplazamiento de fase.

Tabla 2.1 Errores de relación y fase para clases de precisión 0,1 - 0,2 - 0,5 y 1 [10].

Clase de exactitud	± Error de corriente porcentual (relación), al porcentaje de corriente nominal presentado abajo				± Desplazamiento de fase al porcentaje de corriente nominal presentada abajo							
					Minutos				Centirradiantes			
	5	20	100	120	5	20	100	120	5	20	100	120
0,1	0,4	0,2	0,1	0,1	15	8	5	5	0,45	0,24	0,15	0,15
0,2	0,75	0,35	0,2	0,2	30	15	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3
0,5	1,5	0,75	0,5	0,5	90	45	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9
1,0	3,0	1,5	1,0	1,0	180	90	60	60	5,4	2,7	1,8	1,8

Tabla 2.2 Errores de relación y de fase para clases de precisión 0,2S y 0,5S [10].

Clase de exactitud	± Error de corriente porcentual (relación), al porcentaje de corriente nominal presentado abajo					± Desplazamiento de fase al porcentaje de corriente nominal presentada abajo									
						Minutos					Centirradiares				
	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120	1	5	20	100	120
0,2S	0,75	0,35	0,2	0,2	0,2	30	15	10	10	10	0,9	0,45	0,3	0,3	0,3
0,5S	1,5	0,75	0,5	0,5	0,5	90	45	30	30	30	2,7	1,35	0,9	0,9	0,9

Tabla 2.3 Errores de relación para las clases de precisión 3 y 5 [8].

Clase	Error de corriente porcentual (relación), ± al porcentaje de corriente nominal presentado abajo	
	50	120
3	3	3
5	5	5

Para la obtención de estos errores se usa un factor de potencia de 0.8 en atraso en el Burden mientras sea mayor o igual a 5 VA, en caso contrario se usa un factor de potencia de 1.

2.12 Medición de errores

El circuito equivalente aproximado de un transformador de corriente es análogo al del transformador de tensión. La corriente de magnetización (I_m) produce un error de relación debido a que la corriente que sale del secundario no es exactamente la razón entre la corriente del primario y la relación de transformación, sino que una parte de esta corriente se transfiere por la rama de magnetización [8]. Se define el error de relación como:

$$\%e = \frac{I_{sm} - I_s}{I_s} \cdot 100\% \quad (2.8)$$

Lo anterior quiere decir que entre más pequeña sea la corriente de magnetización (I_m), más se igualarán las corrientes del primario y secundario y a su vez será más pequeño el error de magnitud y de fase de la corriente I_s , lo que traduce en un error de medición muy pequeño.

2.13 Variación del Burden

Un incremento del burden (VA de carga) de un TC significan un aumento del valor de tensión y en consecuencia, de densidad de flujo magnético, lo que hace acrecentar el valor de la corriente de magnetización I_m del error de magnitud y fase. De ahí la importancia de conocer cuál es la carga nominal a la que debe trabajar el TC para elegirlo adecuadamente, y de esta manera evitar sobrecargas que afecten los errores normalizados dependiendo de la clase de precisión.

2.14 Variación del factor de potencia

Al disminuir el factor de potencia de la carga se incrementa el ángulo de la misma, ocasionando que I_s e I_m se pongan más en fase y al mantenerse constantes en amplitud porque la carga no aumenta, se modifican sus ángulos, lo que resulta en una disminución de la magnitud de la corriente I_s y un aumento en error de relación [8].

Según la norma NTC 2205, el transformador de corriente debe someterse a ensayos con una carga cuyo factor de potencia sea de 0,8 en atraso, siempre y cuando la carga no sea menor a 5 VA, en ese caso el factor de potencia será de 1. La carga de prueba nunca debe ser menos a 1 VA [10].

Los errores de relación y de fase se calculan teniendo en cuenta los valores de las Tablas I, II y III, cuando la carga secundaria está entre el 25 y el 100% de la carga nominal [10].

2.15 Operación

El devanado primario generalmente tiene pocas vueltas de arrollamiento sobre el núcleo, dado que el objetivo siempre es disminuir los niveles de tensión, en muchos casos el conductor primario pasa directamente a través de un núcleo toroidal, siendo la relación de transformación del TC el mismo número de vueltas del conductor primario sobre el núcleo.

La carga (burden) que se conecta a un TC debe estar conectada en serie, a diferencia de un transformador de tensión, para que el nivel de corriente por el secundario no se vea distorsionado, además se debe procurar que el burden tenga un nivel bajo de impedancia, próximo al cortocircuito. Se debe evitar siempre que el secundario del TC esté abierto, por lo cual no es recomendado usar fusibles que puedan operar ante una falla, también es importante procurar que la carga sea de baja impedancia y cortocircuitar el secundario si se va a retirar la misma, con el fin de evitar un incremento súbito de la tensión en los terminales del secundario del TC (limitado solamente por la impedancia en la rama de magnetización) que podría quemar el conductor, los aislamientos, el núcleo o incluso causar una explosión del TC.

3 METODOLOGÍA

La metodología que propone el presente documento tiene como objeto encontrar un conjunto de ecuaciones no lineales que representen la forma constructiva y el funcionamiento eléctrico de un transformador de corriente de medición tipo bushing. El diagrama de flujo de la Figura 3.1 muestra el procedimiento para encontrar cada uno de los parámetros del TC.

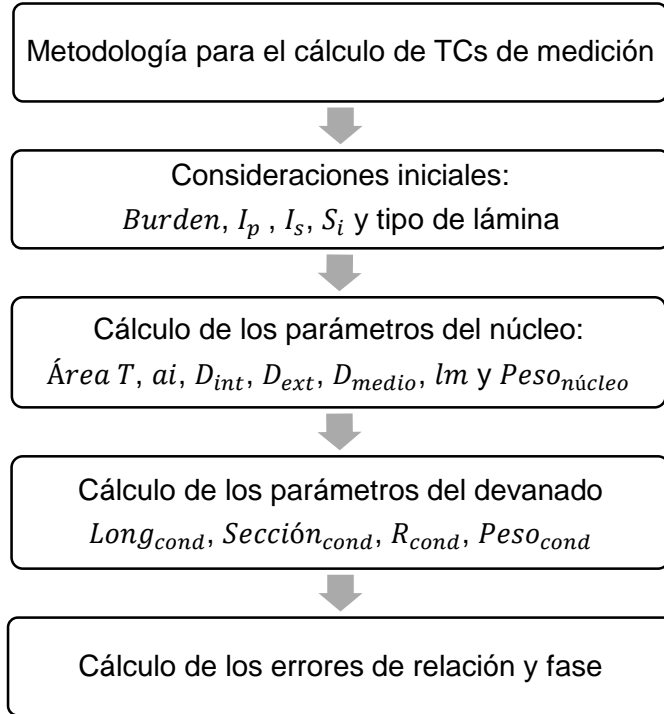


Figura 3.1 Diagrama de flujo sobre la metodología planteada.

3.1 Cálculo de las dimensiones del núcleo

Usando la ecuación fundamental de la máquina se calcula el área transversal del núcleo:

$$Área\ T = \frac{Burden \cdot 10^8}{4,44 \cdot I_{sec} \cdot B \cdot f \cdot n_s \cdot S_i} \quad (3.1)$$

donde,

$Burden$: Carga del TC [VA]

I_s : Corriente secundaria nominal [A]

B : Inducción magnética [Gauss]

f : frecuencia [Hz]

n_s : Espiras en el secundario [Ad]

S_i : factor de apilamiento de la lámina [Ad]

Área_T : Área de inducción magnética [cm^2]

Considerando, las espiras en el secundario de la siguiente forma:

$$n_s = \frac{n_p \cdot I_p}{I_s} \quad (3.2)$$

donde,

I_p : Corriente primaria

n_p : Espiras en el primario

Luego, el apilamiento del núcleo se calcula con la ecuación (3.3).

$$\text{Área}_T = a_i \cdot b_i \quad [\text{mm}^2] \quad (3.3)$$

donde,

b_i : Ancho de la lámina de silicio

a_i : Apilamiento del núcleo

Despejando a_i , se obtiene:

$$a_i: \frac{\text{Área}_T}{b_i} \quad [\text{mm}]$$

Ahora, se calculan los diámetros externo y medio

$$D_{ext} = D_{int} + 2 \cdot a_i \quad [\text{mm}] \quad (3.4)$$

$$D_{medio} = D_{int} + a_i \quad [\text{mm}] \quad (3.5)$$

donde,

D_{int} : Diámetro interno

D_{ext} : Diámetro externo

D_{medio} : Diámetro medio del TC

La longitud media del TC está dada por:

$$l_m = D_{medio} \cdot \pi \quad [\text{mm}] \quad (3.6)$$

Lo anterior, permite determinar el peso del TC de la siguiente manera:

$$Peso_{núcleo} = l_m \cdot a_i \cdot b_i \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} [kg] \quad (3.7)$$

3.2 Cálculo del devanado secundario

El devanado de los transformadores de corriente se calcula según la ecuación (3.8).

$$Long_{cond} = (2 \cdot a_i + 2 \cdot b_i) \cdot N_s \cdot 1,1 \cdot 4 [cm] \quad (3.8)$$

El factor 1,1 se usa para considerar las esquinas del núcleo donde no queda completamente uniforme el conductor y los 4 cm que se suman al final son para los terminales del transformador de corriente. La sección de conductor se debe garantizar tal que el transformador pueda trabajar hasta el 120% de la corriente nominal:

$$Sección_{cond} = \frac{1,2 \cdot I_{sec}}{J} \quad (3.9)$$

La densidad de corriente J típica para transformadores de corriente tiene un valor de 1,8 A/mm². A partir del valor de sección se elige el calibre del cable que cumpla con lo especificado.

La resistencia del alambre se obtiene así:

$$R_{cond} = \frac{Long_{cond} \cdot R/Km}{1000} [\Omega] \quad (3.10)$$

Nota: la resistencia por kilómetro (R/Km) es una variable que depende del calibre del conductor.

El peso del alambre se calcula:

$$Peso_{cond} = \frac{Long_{cond} \cdot \frac{kg}{km}}{1000} [kg] \quad (3.11)$$

Nota: los kilogramos sobre kilómetro ($\frac{kg}{km}$) dependen del calibre del conductor.

3.3 Cálculo del error de relación y error de fase

Para determinar los errores del transformador de corriente se deben encontrar los $\frac{W}{kg}$ y los $\frac{VA}{kg}$ de la lámina de silicio según el nivel de inducción, para ello se realiza el siguiente procedimiento:

Se debe encontrar la impedancia de carga y la impedancia del conductor, con ellas y junto a la corriente de prueba se halla el voltaje inducido (V_{ind}), tal que permita determinar la densidad de flujo (B) a la cual trabaja el TC para la prueba específica. Con el flujo magnético se encuentran los $\frac{W}{kg}$ y los $\frac{VA}{kg}$ y con ellos las pérdidas del transformador.

Se define la impedancia de carga de la siguiente manera:

$$|Z_c| = \frac{Burden_{prueba} [VA]}{I_s^2_{prueba} [A]} [\Omega] \quad (3.12)$$

$$\theta_{zc} = \cos^{-1}(fp) \quad (3.13)$$

donde,

$|Z_c|$: Magnitud de la impedancia de carga

$Burden_{prueba}$: Potencia de prueba del TC

$I_s^2_{prueba}$: Corriente secundaria de prueba

θ_{zc} : Ángulo de la impedancia de carga

fp : Factor de potencia de la carga

Tanto el $Burden_{prueba}$ como la $I_s^2_{prueba}$ y el factor de potencia (fp) son valores conocidos que dependen de la prueba que se quiera realizar. La impedancia se define como la suma de los cuadrados de la resistencia y la reactancia como indica la ecuación (3.14).

$$Z_c = R_c^2 + X_c^2 \quad (3.14)$$

Aplicando teorema de Pitágoras se obtiene:

$$\cos \theta_{zc} = \frac{R_c}{Z_c} \quad (3.15)$$

$$\sin \theta_{zc} = \frac{X_c}{Z_c} \quad (3.16)$$

Teniendo en cuenta que:

$$\cos \theta_{zc} = fp \quad (3.17)$$

y despejando R_c y X_c de las ecuaciones (3.15) y (3.16) respectivamente, se obtiene:

$$R_c = Z_c \cdot fp \quad (3.18)$$

$$X_c = Z_c \cdot \sin \theta_{zc}$$

La resistencia total R_T es la suma de la resistencia de carga y la resistencia del conductor, esta última fue calculada anteriormente a partir de la ecuación (3.10).

$$R_T = R_c + R_{cond} \quad (3.19)$$

La impedancia total se expresa:

$$Z_T = \sqrt{R_T^2 + X_c^2} \quad (3.20)$$

Luego se calcula el voltaje inducido mediante la ecuación (3.21).

$$V_{ind} = I_{sm} \cdot Z_T \quad (3.21)$$

Una vez se obtenga V_{ind} se usa la ecuación fundamental de la máquina para encontrar el campo magnético B_{prueba} .

$$B_{prueba} = \frac{V_{ind} \cdot 10^8}{4,44 \cdot f \cdot n_s \cdot \text{Área}_T} \quad (3.22)$$

Con el campo magnético de prueba hallado B_{prueba} , es posible encontrar las pérdidas $\frac{W}{kg}$ y los $\frac{VA}{kg}$ de excitación en las curvas entregadas por los proveedores de las láminas (ubicadas en el anexo). En este caso se está usando lámina de tipo M3.

Recordando el circuito equivalente de la figura 2.2, se obtienen las corrientes I_m e I_w , que permiten determinar la corriente I_s . Se toma como referencia la corriente de prueba medida según la inducción a la que esté trabajando el transformador.

$$I_m = \frac{\frac{VA}{kg} \cdot \text{Peso}_{\text{núcleo}}}{V_{ind}} \quad (3.23)$$

$$I_w = \frac{\frac{W}{kg} \cdot \text{Peso}_{\text{núcleo}}}{V_{ind}} \quad (3.24)$$

Sea β el ángulo entre la corriente de magnetización y la corriente de la resistencia de esta misma rama.

$$\beta = \cos^{-1}\left(\frac{I_w}{I_m}\right) \quad (3.25)$$

Considerando los valores de magnitud y ángulo de las corrientes $I_{smprueba}$ e I_m , se encuentra la corriente I_s .

$$I_s = \sqrt{(I_{smprueba} \cdot \cos \theta_{zc} + I_m \cdot \cos \beta)^2 + (I_{smprueba} \cdot \sin \theta_{zc} + I_m \cdot \sin \beta)^2} \quad (3.26)$$

- Error de relación: Este error se calcula haciendo una comparación entre la corriente que circula por la carga ($I_{smprueba}$) y la que circula justo antes de la rama de magnetización (I_s), así:

$$\% e = \frac{I_{smprueba} - I_s}{I_s} \times 100\% \quad (3.27)$$

- Error de fase: Este error es el resultado del cambio en el ángulo de la corriente inducida I_s con respecto a la corriente medida $I_{smprueba}$ y se calcula de la siguiente manera:

$$e_{ang} = \gamma - \theta \quad (3.28)$$

donde,

e_{ang} : error angular

γ : ángulo entre I_s y V_{ind}

θ : ángulo entre $I_{smprueba}$ y V_s

Nota: los cálculos de los errores deben hallarse para los valores de norma, con burden de 5, 2.5 y 1.25 VA y las corrientes al 5, 20, 100 y 120 % de I_s .

4 EXPERIMENTOS Y RESULTADOS

4.1 Transformador de corriente de 100/5 A

Uno de los objetivos de la práctica conducente a trabajo de grado es el diseño de un transformador de corriente tipo ventana y su implementación en la práctica, de tal manera que usando las ecuaciones planteadas en el capítulo **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se encuentren las variables de tipo eléctricas que permitan describir el comportamiento del transformador.

Con los procedimientos descritos en la formulación, se encontraron las siguientes variables, teniendo en cuenta algunas consideraciones que se muestran a continuación.

- La potencia nominal de carga del transformador debe ser 5 VA.
- La clase de precisión elegida es 1.
- El transformador elegido debe tener una corriente primaria (I_p) de 100 A y una corriente secundaria (I_s) de 5A.
- Se considera factor de potencia de 0,8 en atraso para las pruebas.
- El número de espiras en el primario N_p es igual a 1.
- El ancho de rollo de silicio es de 4,5 cm y el tipo de lámina a usar es M3 (representa una lámina con comportamientos particulares ante varios niveles de inducción).
- El campo magnético de prueba es de 6000 Gauss.
- Para 100 A en el primario y usando la tabla de calibres, se evidencia que el conductor que soporta dicha corriente es de calibre 2 AWG, cuyo diámetro es de 1,25 cm, esta información permite definir un diámetro interior del TC (D_{int}) de 3,5 cm.
- El número de espiras en el secundario calculado según la ecuación (3.2) es de 20 espiras.
- La densidad de corriente para el conductor en cobre será de 1.8 A/mm².
- El factor de apilamiento S_i se define como 0,95 que es un valor usado comercialmente.

4.2 Cálculos

Los valores encontrados se resumen en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 4.1 Parámetros para un transformador de corriente con relación 100/5 A.

<i>Magnitud</i>	<i>Unidades</i>	<i>Valores</i>	<i>Símbolo</i>
Clase de precisión	-	1	-

Potencia	VA	5	$burden$
Corriente primaria	A	100	I_p
Corriente secundaria	A	5	I_s
Factor de potencia	Adm	0,8	fp
Espiras primarias	Adm	1	N_p
Espiras secundarias	Adm	20	N_s
Ancho rollo de silicio	cm	4,5	bi
Campo magnético	Gauss	6000	B
Diámetro interior	cm	3,5	D_{int}
Densidad de corriente	A/mm ²	1,8	J
Factor de apilamiento	Adm	0,95	S_i
Área total	cm ²	3,29	Área_T
Apilamiento	cm	0,73	ai
Diámetro exterior	cm	3,5	D_{ext}
Diámetro medio	cm	4,23	D_{medio}
Longitud media	cm	13,28	l_m
Peso núcleo	kg	0,335	$Peso_{núcleo}$
Longitud del conductor	m	2,34	$Long_{cond}$
Sección del conductor	mm ²	3,33	$Sección_{cond}$
Calibre del conductor	AWG	12	$calibre$
Resistencia del conductor	ohm	0,01219	R_{cond}
Peso del conductor	kg	0,069	$Peso_{cond}$

4.3 Construcción del prototipo

De acuerdo a los parámetros encontrados en la tabla Tabla 4.1, se construyó un transformador de corriente con relación 100 a 5 A como prototipo.

El núcleo del TC se construyó con lámina de tipo M3 con un ancho de 4,5 cm. Dentro del grupo de láminas usadas en MAGNETRON S.A.S, la lámina M3 es la que presenta menos pérdidas en el hierro a diferentes niveles de inducción. El núcleo construido se puede observar en la Figura 4.1. Cabe resaltar que MAGNETRON S.A.S no cuenta con una máquina capaz de enrollar los núcleos de forma circular, por lo que se garantizó la forma y medidas del núcleo de forma manual y controlada.



Figura 4.1 Núcleo de silicio para el TC con relación 100 a 5 A.

Con el fin de evitar cortos entre espiras en el TC, se procede a aislar el núcleo del devanado con doble capa de papel crepe. Luego se devana el TC de forma manual enrollando cada una de las 20 espiras del secundario en el núcleo con alambre calibre 12 AWG en cobre. Los resultados se observan en la Figura 4.2 y la Figura 4.3.



Figura 4.2 Vista frontal del transformador de corriente con relación 100/5 A, 5VA de Burden.



Figura 4.3. Vista lateral del transformador de corriente con relación 100/5 A, 5VA de Burden.

4.4 Resultados

La validación de las características del transformador de corriente, cuyos cálculos se mostraron en el numeral 4.2, se efectúa mediante la construcción de un prototipo. Para probar el transformador de corriente de 100 a 5 A se utiliza un equipo CPC 100, con el cual se pueden alimentar los 100 A que el TC requiere en el primario (las veces de devanado primario las hace una varilla de cobre de $\frac{1}{2}$ ").

El CPC 100 V es un equipo dedicado a la medición de relación en transformadores de corriente y de potencial, en la Figura 4.4 se pueden apreciar sus características físicas. Tiene diversos modos de funcionamiento en el que se puede determinar potencia activa, reactiva y aparente, comprobación de la curva de excitación, resistencia de puesta a tierra, resistencia del devanado, comprobación de polaridad, factor de potencia, etc. [11].

Se conectó el equipo CPC 100 a la red de 120 V en modo generador de corriente, se ubicaron los cables de potencia a la salida del equipo para alimentar la varilla de $\frac{1}{2}$ " que hace las veces de devanado primario y las pinzas de instrumentación para la medición de los parámetros eléctricos del transformador de corriente tal y como se observa en la Figura 4.5. Una imagen más detallada de la conexión del TC es mostrada en la Figura 4.6.



Figura 4.4 Equipo de prueba CPC 100 [11].

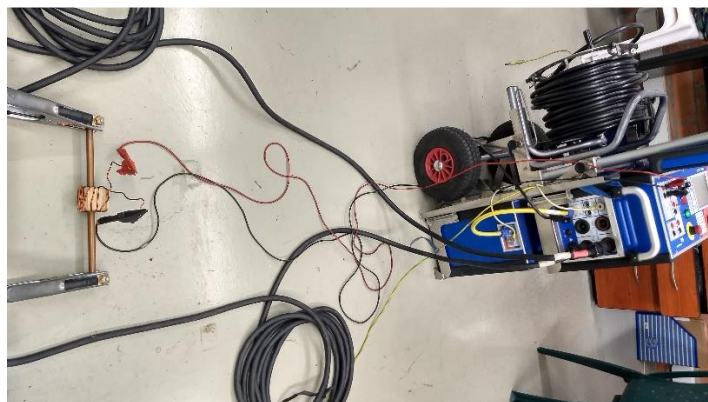


Figura 4.5 Esquema de la prueba.

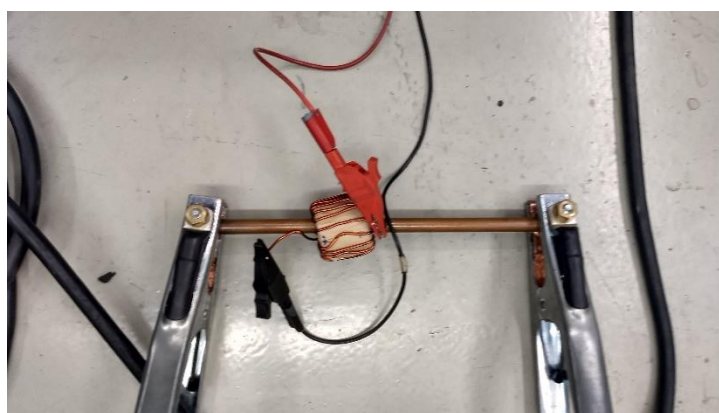


Figura 4.6 Conexión del transformador de corriente.

Luego de implementar el esquema anterior, se procede a energizar el circuito. Inicialmente se verifica la relación de transformación y la polaridad del TC con los terminales cortocircuitados en el secundario, es decir, sin carga.

Con el objeto de efectuar las pruebas a los transformadores de corriente, se debe parametrizar el CPC 100 ingresando la corriente primaria de prueba I_{prueba} y la corriente secundaria esperada I_s . A partir de los datos ingresados y según las mediciones detectadas, el equipo muestra los valores de corriente primaria I_{pm} y secundaria I_{sm} medidas, la relación de transformación, la polaridad, el burden y el error de relación presente en el transformador de corriente.

Los resultados se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2 Parámetros medidos en el TC sin carga.

I_{prueba} [A]	I_{pm} [A]	I_{sm} [A]	relación	polaridad	burden [VA]	error [%]
100,00	100,17	5,00	100:5,00	correcta	5,0	0,05
100,00	100,00	5,01	100:5,01	correcta	5,0	0,23

Donde,

I_{prueba} : Es la corriente tomada como prueba para alimentar el TC en el lado primario.

I_{pm} : Es la corriente primaria medida en el experimento.

I_{sm} : Como se definió anteriormente, es la corriente medida en el secundario.

relación: Equivale a la relación de transformación medida en el TC.

burden: es la carga en VA en el lado secundario del TC.

error: Equivale a la diferencia entre la medida de corriente ideal y la corriente medida.

Posteriormente, se tomaron resultados de las mediciones bajo una carga de 5 VA y para diferentes valores de corriente. La Tabla 4.3 contiene los parámetros encontrados con una carga de 5VA. Los parámetros de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se conservan en la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Parámetros medidos en el TC con carga.

I_{prueba} [A]	I_{pm} [A]	I_{sm} [A]	relación	polaridad	burden [VA]	error [%]
100,00	99,98	4,65	100:4,65	correcta	5,0	6,96
60,00	59,99	2,87	100:4,78	correcta	5,0	4,39

50,00	49,99	2,43	100:4,85	correcta	5,0	2,89
40,00	39,99	1,94	100:4,87	correcta	5,0	2,53
20,00	19,99	0,96	100:4,84	correcta	5,0	3,15
5,00	4,98	0,236	100:4,75	correcta	5,0	5,04

Cabe resaltar que sólo se pudieron determinar los valores de relación de transformación y error de relación, debido a que el CPC 100 no cuenta con un módulo para la lectura de errores de fase en transformadores de corriente.

4.5 Análisis de resultados

El transformador de corriente con relación 100/5 A, burden de 5VA y clase de precisión 1 fue construido según los parámetros encontrados luego de aplicar la metodología propuesta en el capítulo 3.

Con el prototipo construido fue posible validar la formulación de las características físicas del núcleo y las dimensiones del alambre conductor del secundario del TC. También se evidenció que el aislamiento usado entre la bobina y núcleo cumplió con la resistencia mecánica suficiente para evitar cortos entre las espiras del devanado secundario, característica importante si se considera que el devanado podría sufrir afectaciones dado que las esquinas del núcleo son muy afiladas y podrían debilitar el esmalte en varios puntos del circuito hasta romperlo.

En cuanto a los parámetros eléctricos se validó la relación de transformación, la polaridad y se tuvo un acercamiento a la validación del error de relación.

La relación de transformación determinada fue de 100 a 5 A. Cuando el transformador se conectó sin carga presentó errores de relación del 0,05 y 0,23 (Tabla 4.2), evidenciando que cuando no existe una carga en el TC puede transformar correctamente la corriente de 100 a 5 A. A su vez, se hizo la validación de los resultados con una carga de 5VA y se efectuó una comparación entre el error de fase obtenido y los errores máximos definidos en la NTC-2205. Si bien los errores hallados superan en cerca del 2% a los errores máximos permitidos por la NTC 2205 para diferentes valores de burden, los resultados son positivos considerando que el proceso de la construcción del transformador de corriente fue muy poco controlado y con diversas limitaciones de maquinaria y de metodología que pueden afectar la precisión del TC.

Otro de los aspectos importantes es la determinación de la polaridad absoluta de la conexión, esta información es importante para encontrar la dirección de la corriente que conduce el TC, la polaridad marcada por el CPC 100 indicó que siempre fue correcta.

Aunque los errores de fase juegan un papel muy importante en la caracterización de la precisión de un transformador de corriente, no fue posible obtenerlos dado que el equipo CPC 100 no cuenta con un módulo de determinación de error de fase.

4.6 Dificultades

- El núcleo se elaboró con lámina de acero al silicio. Se tuvo la limitación de que los anchos de rollos estaban en la medida mínima de 4,5 cm, por lo cual el núcleo del transformador se debía ajustar a esta dimensión. Tampoco se contaba con una máquina especial para construir el núcleo circular, por lo que se implementó de forma manual.
- El devanado del transformador de corriente se construyó manualmente, debido a que MAGNETRON. S.A.S no cuenta con una máquina bobinadora para este tipo de equipos que son de menor tamaño.
- No fue posible determinar el error de fase de las pruebas realizadas en el transformador de corriente, dado que el CPC 100 no tiene disponible un módulo para tomar este parámetro.

5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1 Conclusiones

- La metodología para la construcción de transformadores de corriente tipo bushing propuesta en este documento permitió encontrar las características físicas y los parámetros electromagnéticos necesarios para construir un prototipo para pruebas. La relación de transformación del TC es de 100 a 5 A, el burden es de 5 VA y la clase de precisión es de 1. A partir de un conjunto de ecuaciones no lineales fueron encontradas las dimensiones del núcleo y del devanado secundario, con el fin de llevar a cabo el ensamble del transformador y la ejecución de las pruebas.
- Para diseñar un transformador de corriente de medición se deben recopilar la información sobre la corriente de entrada y de salida requerida, el burden y las limitaciones de tipos de láminas ferromagnéticas que se pueden usar para la elaboración del núcleo. Luego de encontrar los datos preliminares se procede a hallar los parámetros del núcleo, tales como el área, apilamiento, diámetros y peso. Posteriormente se halla la sección, peso y longitud del alambre conductor para el devanado secundario. Los resultados anteriores son suficientes para iniciar el proceso de fabricación de un transformador de corriente.
- En las pruebas del prototipo se utilizó el equipo CPC 100, para medir parámetros eléctricos como relación de transformación, la polaridad y el error de relación. Al someter a pruebas el TC se halló un error de relación un 2% superior al valor permisible definido en la norma NTC 2205.
- Durante la fabricación del prototipo se encontraron varias dificultades que impidieron llegar a los parámetros establecidos por la norma. Uno de los hechos que más afecta es la construcción manual de cada una de las piezas del transformador, dado que no existe una máquina especializada en construir los núcleos y las bobinas. Otra dificultad presentada durante la validación del prototipo fue el hecho de no poder determinar el error de fase, parámetro que se debe validar dentro del protocolo de pruebas exigido por la NTC 2205.
- Los parámetros encontrados en el transformador de corriente muestran un comportamiento favorable teniendo en cuenta las limitaciones en la construcción del mismo. Se validó la relación de transformación de 100 a 5, la polaridad del TC y se encontraron errores de fase cercanos al 2% por encima de norma. Sin

embargo, estos errores son una oportunidad para encontrar ajustes en la metodología que permitan garantizar los valores esperados de precisión.

- Los transformadores de corriente de medición son usados en aplicaciones de protecciones eléctricas para medir la corriente de los equipos, variable que se debe determinar con alta precisión con el objeto de preservar la seguridad de los equipos y la integridad de las personas. Por este motivo es fundamental lograr que los errores de fase y de relación se encuentren dentro de la normatividad vigente, con el fin de que MAGNETRON S.A.S pueda ingresar al mercado de los transformadores de corriente con productos que cumplan con todos los estándares de calidad.

5.2 Trabajos futuros

Para obtener productos que cumplan con la normatividad vigente, MAGNETRON S.A.S deberá continuar construyendo prototipos de prueba en los que se validen los parámetros de error que en el presente documento no se pudieron obtener por las razones ya sustentadas. Además, MAGNETRON S.A.S deberá invertir en una máquina para el corte de láminas de silicio y una máquina bobinadora especial. Con inversión y nuevas investigaciones respecto al modelamiento de los transformadores de corriente de medición, MAGNETRON S.A.S podrá iniciar un proceso de manufactura para ingresar este nuevo producto al mercado y así ampliar su portafolio de ventas, expandiéndose al mercado de los transformadores de corriente.

REFERENCIAS

- [1] J. Olivares Galván, M. A. Venegas, and S. Magdaleno, "La historia del transformador," *IEEE sección México*, no. Aplicaciones industriales y exposición industrial, 2006.
- [2] S. Kumar, L. Jain, R. Gorur, G. Karady, and R. Ayyanar, "Electric Field Calculations on Dry-Type Medium Voltage Current Transformers," 2012.
- [3] E. A. Martínez Londoño, "DIAGNÓSTICO DE TRANSFORMADORES DE CORRIENTE Y DE POTENCIAL A PARTIR DE LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE PRUEBAS," 2018.
- [4] S. Ramírez Castaño, "Protección de sistemas eléctricos de potencia," 2003.
- [5] SIEMENS, "Transformadores de protección y medida 4M," 2009.
- [6] S. J. Chapman, *Máquinas eléctricas*. McGraw-Hill, 2012.
- [7] AK Steel, "CARLITE ® GRAIN ORIENTED ELECTRICAL STEELS."
- [8] J. F. Cadena Lemos, "Diseño y construcción de un transformador de corriente de uso industrial para medida en baja tensión," 1991.
- [9] Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, "Resolución CREG 038 de 2014 por la cual se modifica el Código de Medida contenido en el Anexo general del Código de Redes," 2014.
- [10] ICONTEC, "NTC 2205," 2004.
- [11] OMICRON, "CPC 100."

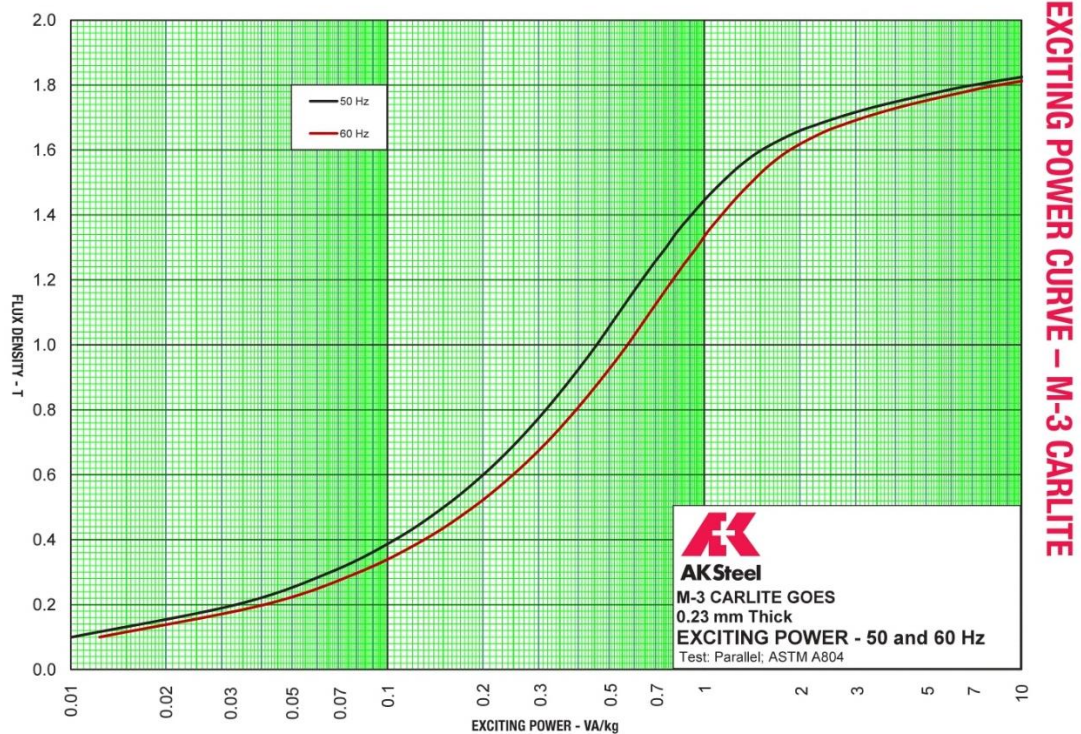
ANEXOS

TYPICAL VALUES OF RMS EXCITING POWER

AT 50 AND 60 Hz FOR TYPICAL SHEET SPECIMENS OF AK STEEL ORIENTED CARLITE COATED ELECTRICAL STEELS

Flux Density (T)	Exciting Power (rms VA/kg) - ASTM A804							
	0.23 mm M-3 CARLITE GOES		0.27 mm M-4/120 CARLITE GOES		0.27 mm M-4/125 CARLITE GOES		0.30 mm M-5/125 CARLITE GOES	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
0.1	0.0101	0.0123	0.0104	0.0129	0.0109	0.0134	0.00918	0.0114
0.2	0.0334	0.0411	0.0340	0.0424	0.0354	0.0440	0.0302	0.0380
0.3	0.0662	0.0814	0.0671	0.0840	0.0693	0.0867	0.0603	0.0762
0.4	0.106	0.131	0.108	0.135	0.111	0.139	0.0978	0.124
0.5	0.151	0.187	0.154	0.194	0.158	0.199	0.142	0.181
0.6	0.201	0.249	0.206	0.261	0.212	0.267	0.193	0.246
0.7	0.256	0.318	0.265	0.335	0.270	0.342	0.250	0.320
0.8	0.316	0.394	0.329	0.417	0.335	0.425	0.314	0.403
0.9	0.382	0.478	0.400	0.509	0.407	0.517	0.386	0.495
1.0	0.457	0.572	0.480	0.611	0.487	0.620	0.467	0.600
1.1	0.538	0.674	0.569	0.725	0.577	0.734	0.558	0.717
1.2	0.634	0.794	0.674	0.857	0.681	0.867	0.666	0.854
1.3	0.757	0.946	0.804	1.02	0.811	1.03	0.799	1.02
1.4	0.905	1.13	0.964	1.22	0.969	1.23	0.971	1.24
1.5	1.15	1.42	1.22	1.53	1.22	1.53	1.22	1.54
1.6	1.51	1.86	1.57	1.95	1.57	1.95	1.61	2.01
1.7	2.64	3.19	2.75	3.36	2.78	3.38	2.87	3.51
1.8	7.04	8.47	7.71	9.36	8.05	9.64	8.03	9.76
1.9	25.9	31.1	27.3	33.3	28.8	34.4	27.9	34.1

Anexo. 1 Valores de excitación ($\frac{VA}{kg}$) [7].



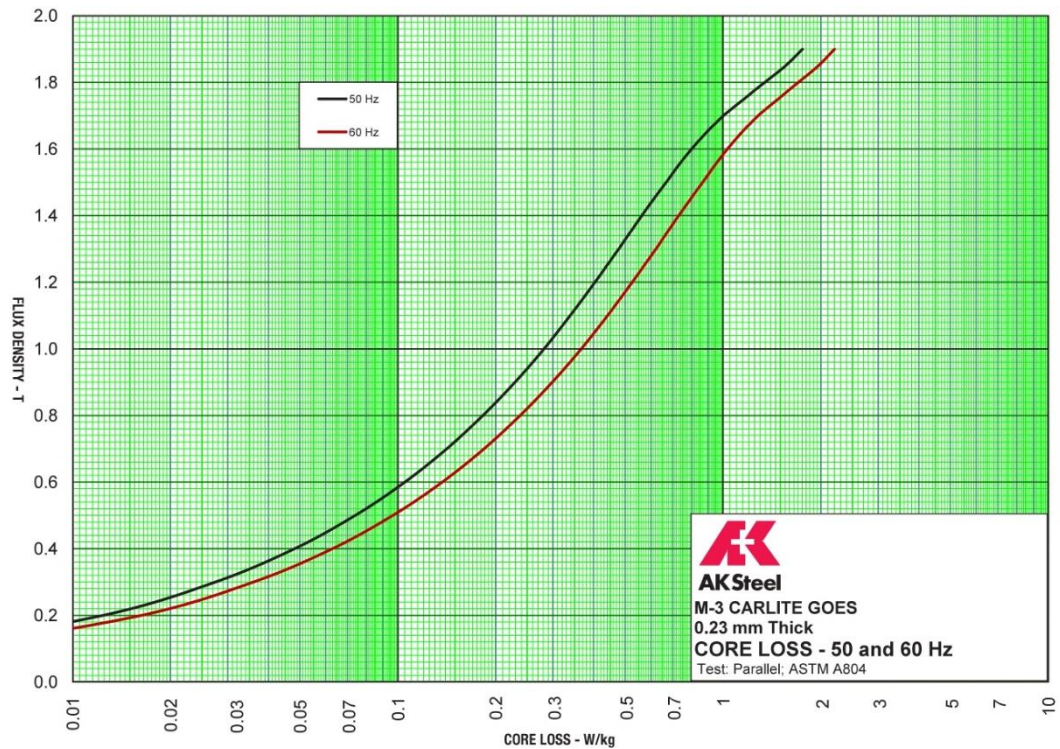
Anexo.2 Curva de excitación ($\frac{VA}{kg}$) [7].

TYPICAL VALUES OF CORE LOSS

AT 50 AND 60 Hz FOR TYPICAL SHEET SPECIMENS OF AK STEEL ORIENTED CARLITE COATED ELECTRICAL STEELS

Flux Density (T)	Core Loss (W/kg) - ASTM A804							
	0.23 mm M-3 CARLITE GOES		0.27 mm M-4/120 CARLITE GOES		0.27 mm M-4/125 CARLITE GOES		0.30 mm M-5/125 CARLITE GOES	
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
0.1	0.00324	0.00424	0.00404	0.00533	0.00442	0.0058	0.00426	0.00567
0.2	0.0125	0.0164	0.0155	0.0205	0.0166	0.0219	0.0165	0.0219
0.3	0.0275	0.0360	0.0336	0.0444	0.0357	0.0470	0.0359	0.0478
0.4	0.0481	0.0629	0.0584	0.0765	0.0613	0.0805	0.0621	0.0827
0.5	0.0740	0.0965	0.0882	0.116	0.0928	0.122	0.0948	0.126
0.6	0.105	0.137	0.124	0.164	0.130	0.171	0.134	0.178
0.7	0.141	0.184	0.166	0.218	0.173	0.227	0.180	0.238
0.8	0.183	0.238	0.213	0.281	0.222	0.292	0.232	0.307
0.9	0.229	0.298	0.267	0.351	0.278	0.365	0.291	0.385
1.0	0.281	0.366	0.327	0.430	0.340	0.447	0.358	0.473
1.1	0.339	0.441	0.395	0.519	0.410	0.539	0.432	0.570
1.2	0.404	0.525	0.471	0.620	0.489	0.642	0.515	0.680
1.3	0.477	0.621	0.558	0.734	0.580	0.760	0.608	0.803
1.4	0.562	0.731	0.657	0.863	0.682	0.893	0.714	0.942
1.5	0.668	0.866	0.778	1.02	0.806	1.05	0.842	1.11
1.6	0.799	1.03	0.921	1.20	0.955	1.24	0.993	1.30
1.7	1.00	1.28	1.13	1.47	1.18	1.52	1.21	1.57
1.8	1.34	1.70	1.45	1.86	1.51	1.94	1.53	1.98
1.9	1.75	2.20	1.70	2.18	1.91	2.42	1.92	2.45

Anexo.3 Valores de pérdidas por efecto Joule ($\frac{W}{kg}$) [7].



Anexo.4 Curva de pérdidas por efecto Joule ($\frac{W}{kg}$) [7].